

创新·严谨·团结·奋进

当前位置：首页 > 科学传播 > 力学园地 > 前沿动态

前沿动态

【前沿动态】漩涡流动机制在海洋生态保护及资源开发领域的应用

发布时间：2023-11-30

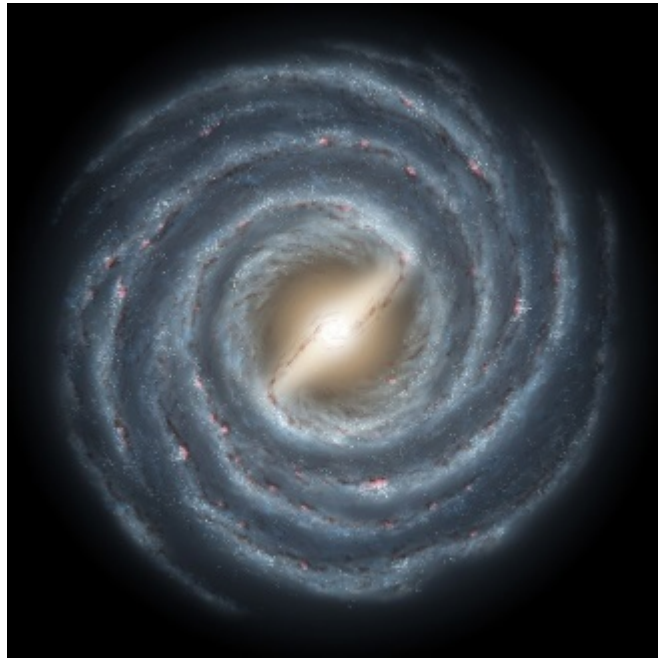
编者注：中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室的多相流及流固耦合课题组，基于表面漩涡携带特性和旋流分离原理，提出了浓缩式漩涡撇油器的概念，从而为海洋石油开发中的溢油快速处理技术提供了新思路。本刊特此发布刘硕等人的文章，全面介绍这项新技术的原理、应用和挑战，以飨读者。

漩涡流动机制在海洋生态保护及资源开发领域的应用

刘硕 杨猛 侯林彤 许晶禹

一、概述

漩涡是一种流动状态，顾名思义，它是指流体所做的一种回转运动。我们的古人对自然界中的漩涡，很早就有记载，但大多略带负面色彩。例如，郦道元曾写道“又东为净滩，夏水急盛，川多湍洑，行旅苦之”（《水经注·卷二十八》）；唐代杜甫则记录“欹帆侧柁入波涛，撇漩捎濑无险阻”（《最能行》）；清代段玉裁认为漩是“峡中回流大者。其深不测。舟遇之则旋转而入”（《说文解字注》）。



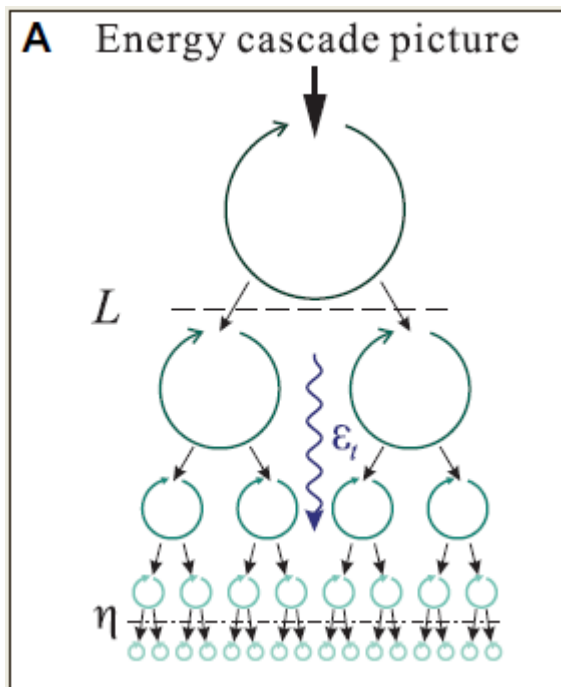


图1 不同的漩涡（上：银河系，中：海洋漩涡，下：不同尺度湍流漩涡）（图片来源：网络）

事实上，漩涡是一种普遍的流动现象，从星系演化（以银河系为例，空间尺度 10^{22} m）到地表海洋流动（以中尺度漩涡为例，空间尺度 10^6 m），乃至湍流中的能量传递（以粘性耗散涡为例，空间尺度可低至 10^{-6} m），漩涡无不发挥着重要作用。

二、漩涡演化特性

科学家一般是定义空间中流体微团在某个坐标系，例如柱坐标系（ $r-\theta-z$ ），的运动状态来描述漩涡流动的。图2描绘了柱坐标系（ $r-\theta-z$ ）中流体微团M所在位置（ r, θ, z ），这个微团的各向分速度（ v_r, v_θ, v_z ）分别叫做径向速度、切向速度和轴向速度。

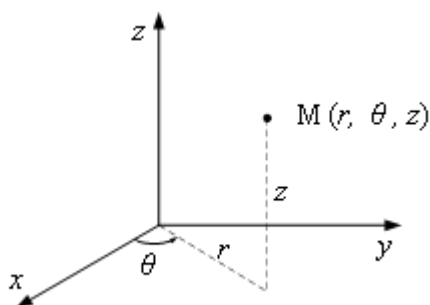


图2 柱坐标系示意图（图片来源：作者自制）

那么，典型漩涡运动的图像是怎样的呢？这里以水面上形成的兰金涡（Rankin Vortex）模型为例，其中假定液体为无粘性的不可压缩流体、流动为层流状态[1]。如图3a所示，在临界半径 R_0 以内的区域，流体微团的切向速度 v_θ 正比于半径，其速度分布形式类似于刚体运动那样线性增加，在 R_0 处达到其最大值 U_0 ；在 R_0 以外的区域，切向速度 v_θ 随半径增加而逐渐减小。人们称 R_0 域外的涡为“自由感生涡”，其中切向速度 v_θ 和半径 r 的乘积（即所谓的“涡通量”）保持不变。基于伯努利方程，我们可以得到图3b所示的压力分布形式。具体而言，距离漩涡轴心无穷远的位置接近环境的参考压力 p_0 ，漩涡区域则为负压。如果场景是在重力场中，我们不难可以进一步计算得到自由液面的形状。如图3c所示，自由面核心下凹，远端逐渐接近静止液面。不难理解，当物体接近漩涡时，在压力驱动和液位影响的双重作用下，有被吸入的危险。尽管这个模型有一定的假设条件，但它定性表征了漩涡流动的一些基本特征。

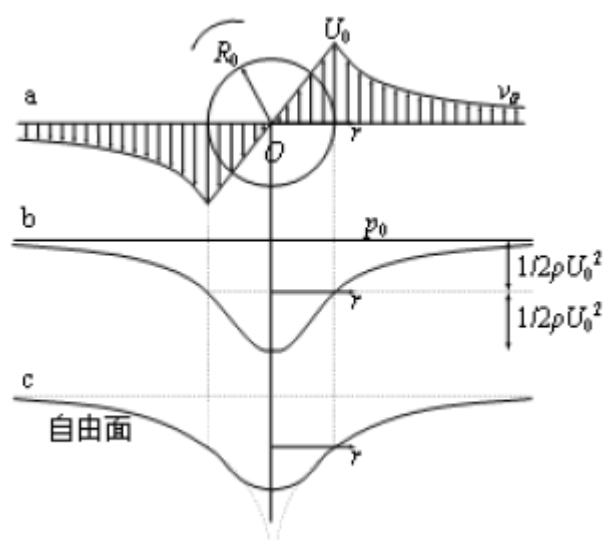


图3 兰金涡：a. 切向速度，b. 压力，c. 自由面分布[1]

在自然界和工程中，常常可以见到各种表面涡。对于这类实际存在的漩涡，由于流体具有粘性，会耗散漩涡的能量，所以表面涡一般是有限长度的。根据不同参量相对大小的变化，表面漩涡可划分为如图4所示的六种不同形式[2]：（1）表面涡纹。表面不下凹，表面以下流体旋转不明显或十分微弱；（2）表面漩涡。表面微凹，表面之下有浅层的缓慢旋转流体，但未见向下延伸；（3）染色漩涡。表面下陷，表面之下有向下延伸的旋转流体，但其中只有水没有气。若将颜色水注入其中时，可见染色水体形成明显的漏斗状旋转水柱；（4）挟物漩涡。表面下陷明显，但表面之下向下延伸的旋转流体中仍然不含气。若有漂浮物落入漩涡后，会随漩涡旋转下沉；（5）间断吸气漩涡。表面下陷较深，表面之下向下延伸的旋转流体中间歇含气，即以气泡形式出现；（6）连续吸气漩涡。漩涡中心为贯通的漏斗形气柱。这表明，随着旋流强度的增加，表面下凹程度增加，漩涡夹带能力增加，最终会把表面上方的空气卷入，漩

涡中心为贯通的漏斗形气柱。如果在气柱下方设有出口，液面上方部分气体可经漩涡排出。而且，如果表面上方是另一种液体，亦可将表层液体移除。这就是表面涡得以在工程中应用的原理。

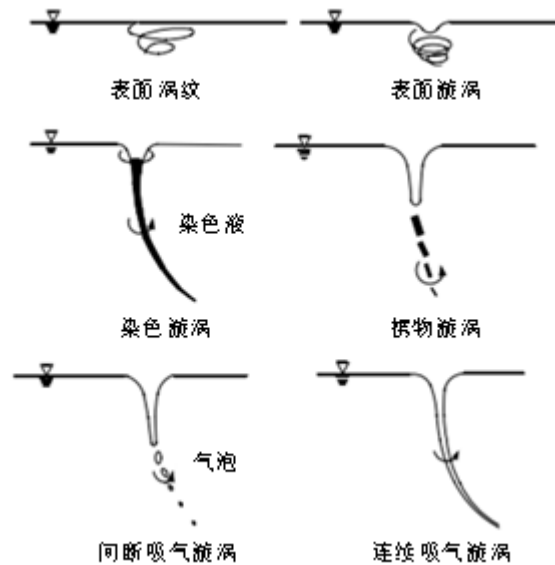


图4 表面漩涡的不同分类[2]

表面漩涡在许多工程中有所应用，它们大多在负压出口和地表科式力共同作用下形成。如图5所示，表面漩涡涉及到的关键几何参量为：临界淹没深度 h 、底部出口直径 d 、底部出口流量 Q 等。当 h 等于或大于水深 H 时，液面上方的流体便可从下面的出口移出。

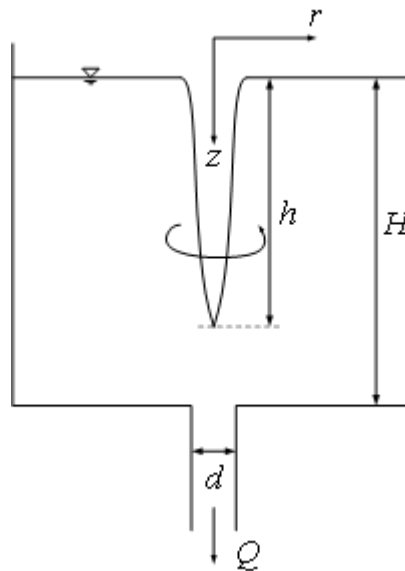


图5 临界淹没深度示意图[2]

科学家开展了一系列的工作来探究表面漩涡各个物理量之间的关系，综合考虑了湍流、液体粘性等多种因素，并建立起了弗洛德数、雷诺数、韦伯数和速度环量等与淹没深度 h 之间的关系。当然，这些专业术语以及相关的科学内容，超出了科普文章的范畴，在此不予以细致解释了。我们只要记住：相关研究表明了通过调整外部参数可以控制淹没深度 h ，从而使漩涡具有吸入能力；而且，漩涡底部吸出的流体大部分来自液面表层[2]。这些研究结果对于漩涡的应用十分有用。

三、漩涡运动特性在海面溢油回收中的应用

在充分了解漩涡演化机制的前提下，可以巧妙利用来获得意想不到的应用效果。以海洋溢油快速处理为例，在海上原油生产和集输过程中，有可能会发生原油泄漏的意外事故。由于油水的密度相差很大以及油水难以相容的情况，溢油会以游离的状态漂浮在泄漏地点附近海面上，因而对周围生态系统造成了严重的影响，还可能威胁人员生命财产安全。如何快速处理海面浮油呢？一般情况下，用于回收水面浮油的机械装置是撇油器，常见的撇油器有圆盘式、真空式和堰式等。但是，受结构形式及机理限制，这些撇油器在复杂海况下快速回收溢油略显乏力，必需从原理上突破，提高回收效率。

中国科学院力学研究所多相流及流固耦合课题组基于表面漩涡携带特性和旋流分离原理，提出了浓缩式漩涡撇油器的概念。该种理念是通过诱导形成表面漩涡来收集水面表层油水混合液，再通过旋流分离提高混合液含油率进行回收来提高溢油回收效率。研究团队研发了原型机，这个系统有一个入口来收集水面表层油水混合液，并设有两个出口，其中一个出口A的液体是通过旋流分离后得到的可回收油品（只含少量水），另一个出口B的液体则是分离出来可以外排的水（依然含有少量油）。利用原型机，研究团队分别以白油（一种经过精炼的矿物油）和渤海中质（中等密度）原油为溢油，开展了原理性测试，同时还进行油-气-水三相流场数值模拟，研究了漩涡区域各相的演化规律。

表面漩涡回收溢油的原理性试验如图6所示，最初水面有一层漂浮的原油，启动造涡装置后，表层浮油膜逐渐收缩变厚，跟随漩涡进入撇油器内部管路。随着时间推移，漩涡区表层浮油被漩涡吸收逐渐减少，其他非浮体遮挡区域的浮油逐渐漂移进入漩涡区被收集。最终大部分浮油均被漩涡吸入，实现回收目标。图7给出了漩涡区油-气-水三相流场在5秒到17.5秒期间的演化历程，这是研究团队的数值模拟结果。可见随着时间推移，漩涡中的浮油逐渐减少，与实验观测一致。计算结果表明：相比而言，中质原油的吸入速率更高。

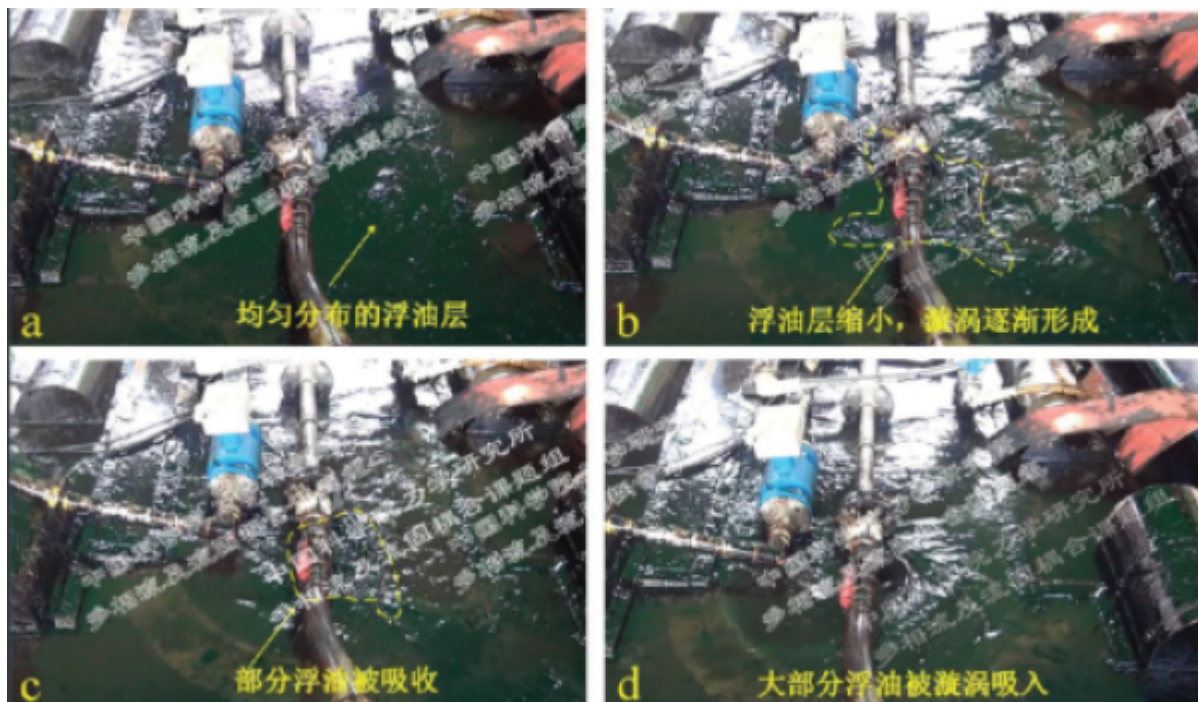


图6 表面旋涡回收溢油的原理性测试[3]

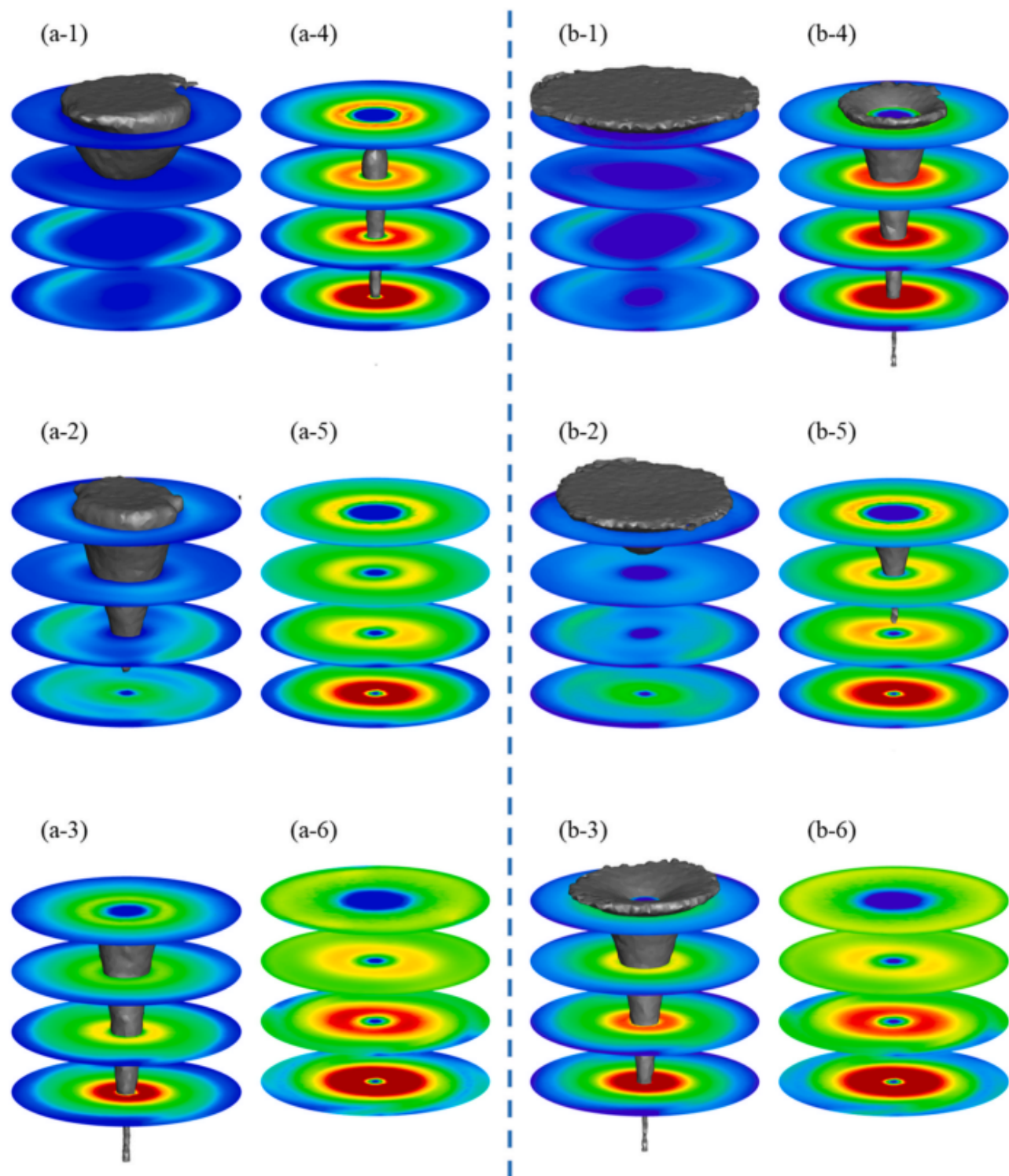


图7 油气水三相自由表面漩涡形成和演化历程：原油（左侧）：a-1 5s，a-2 6s，a-3 8s，a-4 9s，a-5 12s，a-6 17.5s；白油（右侧）：b-1 5s，b-2 6s，b-3 8s，b-4 9s，b-5 12s，b-6 17.5s）[4]

对于这种新型撇油器的回收效果，研究团队也开展了细致的研究。他们采用回收效率 β 表征回收效果，即回收液体中油品流量对入口混合液流量的比值。回收效率（Recovery Efficiency）随分流比（Split Ratio）的变化规律在图8中给出，其中包括了白油（white oil）和

中质油 (crude oil) 两种油品。这里的分流比是指出口A的回收混合液流量对入口混合液流量的比值。可见随着分流比提高，回收效率逐渐提高。人们可以根据油品及回收速率，合理设置分流比，达到最理想的溢油回收效果。具体而言，可以通过控制不同出口的阀门打开程度，改变过流面积，实现对分流比的有效调控。

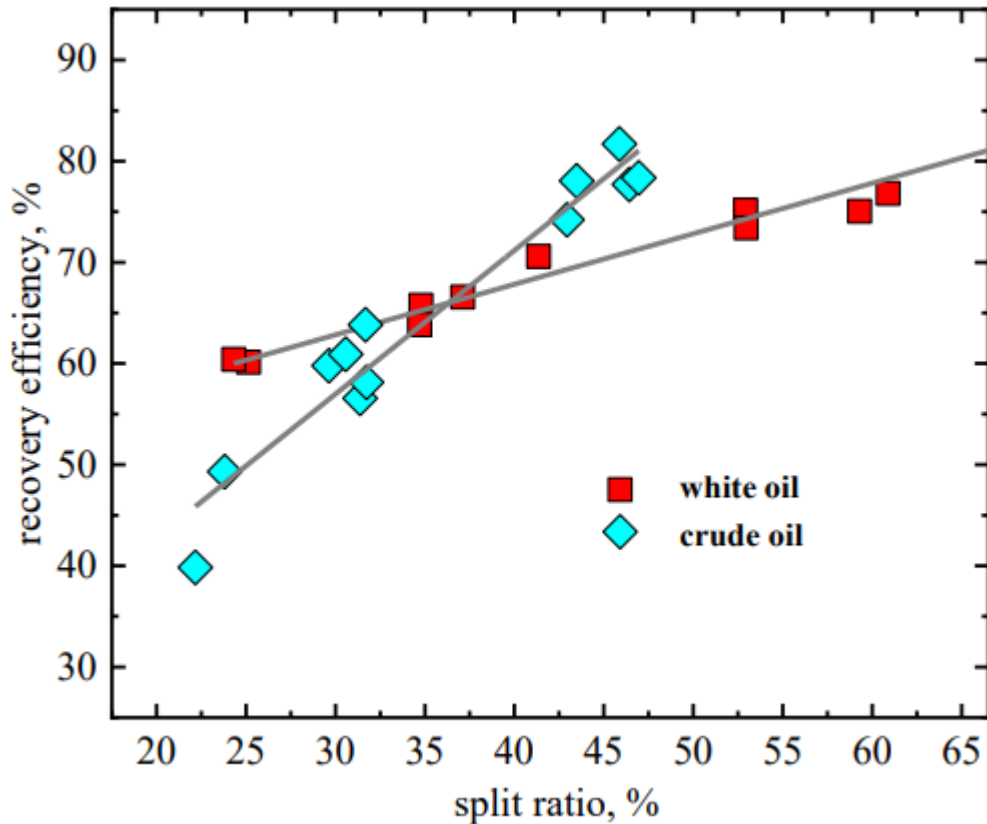


图8 不同油品的回收效率曲线[4]

四、漩涡运动特性在旋流分离中的应用

4.1 有限空间内的漩涡流动特性

以上案例是对半无限空间内的漩涡运动机理的应用。如果将漩涡限制在有限空间内，例如管道中，那么由于边界（管壁）的限制，液体流动形式和速度分布发生变化。在这种有限空间内，漩涡流场可以划分为内漩涡、外漩涡和近壁区三个区域。内漩涡的运动形式取决于上游启旋方式；外漩涡则与兰金组合涡的自由感生涡相似；内外漩涡区的分界线为切向速度达到最大值的位置处。近壁区内速度迅速衰减至0。这种漩涡结构已经有学者进行过观测验证[5]。

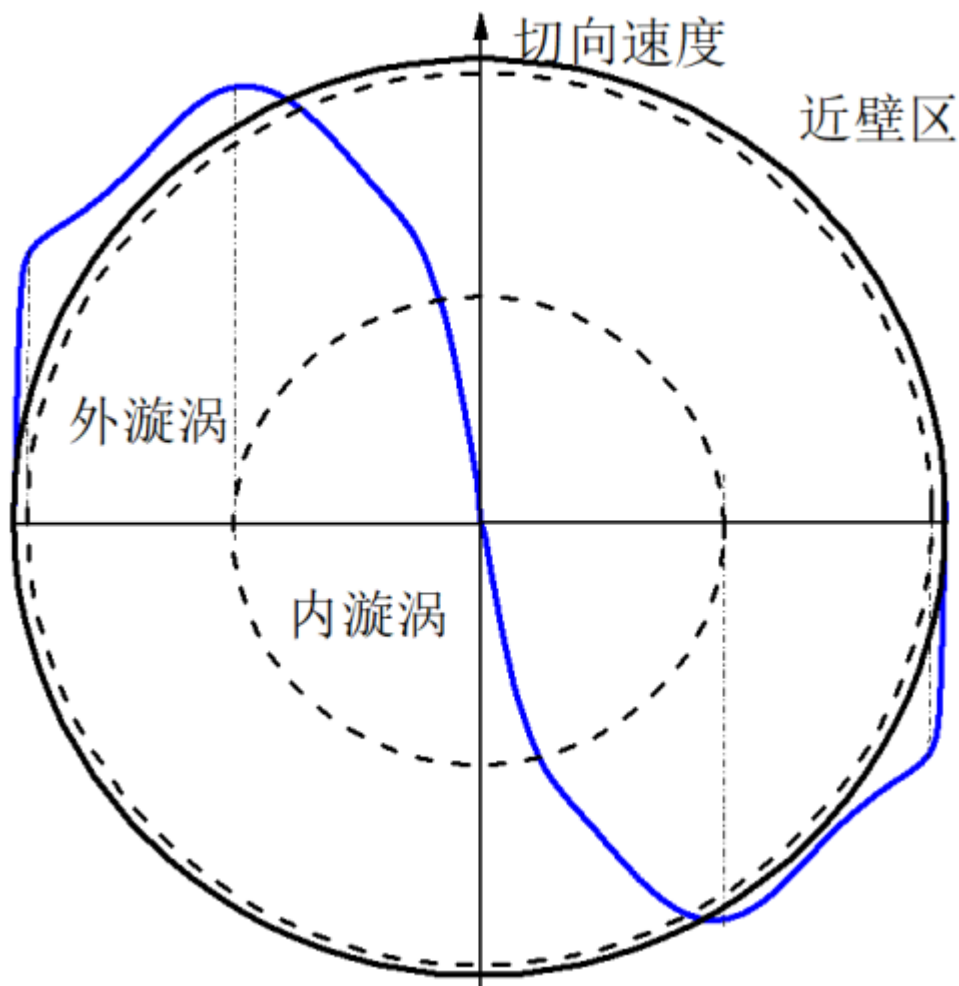


图9 旋流场切向速度分布形式 (图片来源 : 作者自制)

如果流经管道的是一种液-固两相流体，具体而言，就是夹杂有许多微小固体颗粒的液体。此时，科学家将旋流场中体积分数占据大多数的液体相称为连续相，将体积分数占少部分且以分散形式存在的颗粒相称为分散相。在这个旋流场中，分散相会相对于连续相产生径向迁移运动（参见图10）。旋流分离装置就是基于这种分散相的富集现象，其实质是利用离心加速度替代重力加速度，在较短距离内实现分散相的快速沉降。图10中还示出了位于上游处的启旋器。当然，如果连续相液体中夹杂的是另一种不相溶的液滴（例如水中含少量油滴），在这种液-液两相流体中，依据同样的道理，分散的液滴也会产生径向迁移运动。这就是旋流分离装置的工作原理。



图10 旋流分离装置中颗粒运动轨迹示意（图片来源：作者自制）

力学研究所多相流及流固耦合课题组长期致力于旋流分离装置的研究，相关装置已在南海恩平作业区、大庆油田、辽河油田等多个油田获得应用。经过旋流器深度处理后的水中含油率可低至50 mg/L，达到了排海标准。设计高效旋流分离装置时，有一个重要的参数——旋流强度，它是旋流场中的一个重要指标，定义为切向动量与轴向动量的比值。在流体惯性和粘性的相互制衡下，旋流强度沿着管道轴线方向逐渐衰减。通过调整旋流强度，可实现分散相的快速富集回收，在空间需求和处理速度上远优于常规的重力沉降式分离技术。这里提到的“重力沉降式分离”是一种基于重力沉降原理的罐式分离技术，利用油与水的密度差异，使它们在重力作用下发生相对运动导致水沉降到下方。一般情况下，要通过大体积腔体结构来增加混合液驻留时间，以改善分离效果。

4.2 旋流分离技术面临的难点

随着非常规油气资源和边际油田的深度开发，油气采出液中主要成分是液体（通常是油水混合液）但含有不少的气，这时人们首先要把采出液中的气分离出来。对于这类流体，可能会呈现出非牛顿流变特性。而现有的旋流分离技术大多基于连续相是牛顿流体的假定提出来的。所以，需要探索非牛顿气液旋流分离原理以满足非常规油气资源及低品位油气采出液预处理的迫切需求。

什么是非牛顿流体？它是指应力-剪切应变率不是线性关系的流体（参见图11）。相比而言，牛顿流体就是应力-剪切应变率是线性关系的流体。在日常生活中，纯净水是牛顿流体，淀粉糊是非牛顿流体。在非牛顿流体中，有一类叫做“幂率流体”，它们的粘性系数和流体速度

梯度呈幂指数关系，通常用 n 表示幂指数。当 $n > 1$ 时，流体呈现出剪切变稠特性，具体而言，就是剪切速率越大流体变得越稠密。当 $n < 1$ 时，流体呈现剪切变稀特性，与前者相反，剪切速率越大流体变得越稀薄。如何考虑非牛顿流体的旋流分离特性是人们面临的一个技术难点。

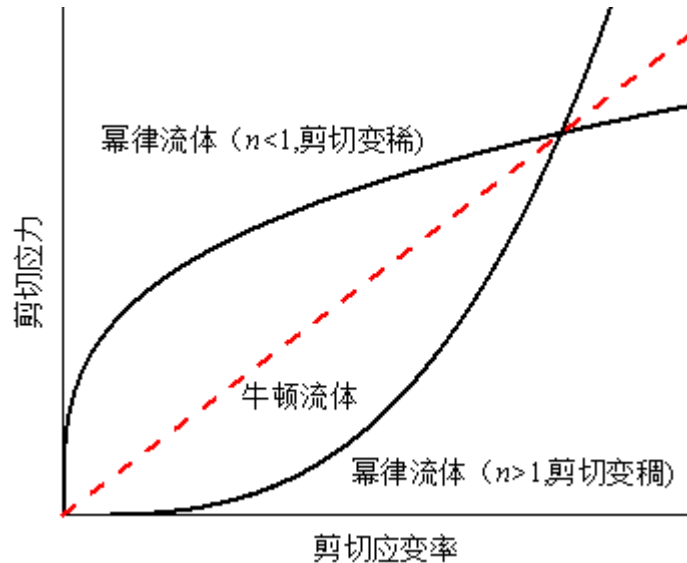


图11 幂率流体流变学特性[7]

4.3 气体-幂率流体旋流强度变化规律

以非牛顿液体与气体的旋流分离为对象，力学所多相流及流固耦合课题组开展了相关机理研究。通过在水中添加化学药剂并调整浓度，获取不同流变参数的幂率流体，开展气-液强旋流场流动特性测试，观测旋流场中各相分布及压力分布。同时结合大涡模拟（LES）湍流模型和混合多相流模型，开展对应工况的数值模拟，细化表征流场参数分布，分析流场旋流强度衰减规律。研究表明幂率流体参数影响旋流场气柱形状（参见图12）。在图12中， k 为稠度系数， α 为气相含率， Re 为雷诺数。图13则给出旋流强度 Ω 沿程变化规律，对比了幂率流体和纯水两种情况。在起始段（ $z/d \leq 2$ ）旋涡逐渐形成，旋流强度增加，达到最大值后开始耗散衰减。衰减规律大体为线性关系。幂率系数 k 和幂率指数 n 共同决定该线性关系的斜率和截距，具体而言，较大的 k 和 n 导致旋流强度衰减更快。



图12 不同幂率参数条件下的气液界面形状 (a. $k=0.01337 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $n=0.08056$, $\alpha_{giso}=0.8$, $Re=25447$; b. $k=0.01337 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $n=0.08056$, $\alpha_{giso}=0.8$, $Re=6997$; c. $k=0.02 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $n=0.65$, $\alpha_{giso}=0.65$, $Re=5836$; d. $k=0.02 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $n=0.89$, $\alpha_{giso}=0.65$, $Re=3732$; e. 纯水, $\alpha_{giso}=0.65$, $Re=64280$) [6]

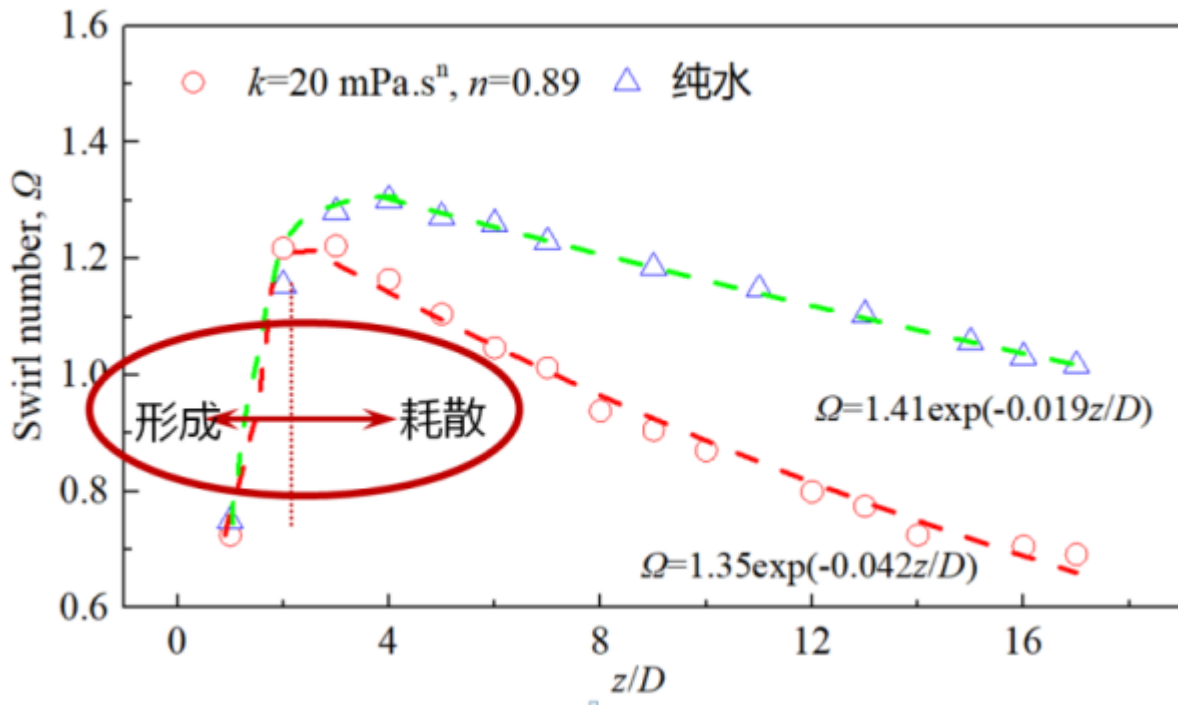


图13 不同幂率参数下的沿程旋流强度变化[6]

五、总结与展望

漩涡是一种有趣的流动，人们可以利用它的运动特性，为海面溢油回收和油气井采出液分离技术带来优化和革新。近年来，深海的能源开发趋势日益受到世界各国的关注，这项技术在中面临着深海极端环境因素（例如水下温度场、压力场）、多场耦合因素（重力场+电磁场）和化学药剂因素（例如分散剂或破乳剂等）的挑战，需要从机理进一步突破。目前，力学研究所多相流及流固耦合课题组团队在中国科学院战略先导专项、国家自然科学基金以及大型国企重点装置研发项目的资助下，正在逐步开展相关研究工作。

参考文献：

- [1] 周光炯. 流体力学.上册-2版[M]. 高等教育出版社, 2000.
- [2] 李海峰. 自由表面旋涡的机理研究[D]. 上海大学, 2009.
- [3] An W., Zhang Q.F., Zhao J.P., Qu L., Liu S., Yang M., Xu J.Y. Mechanism Investigation on a Novel Oil Recovery Skimmer Coupling Free Surface Vortex and Cyclone Separation[J]. *ACS Omega*, 2021, 6, 20483.
- [4] Yang M., Hou L.T., Wang L.S., Liu S., Xu J.Y., Effect of oil properties on spilled oil recovery using a mechanism coupling surface vortices and cyclone separation[J]. *Ocean Eng.* 2022, 263, 14.
- [5] Kitoh. O. Experimental study of turbulent swirling flow in a straight pipe[J]. *J. Fluid Mech.* 1991, 225, 445.
- [6] Liu S., Zhang J., Xu J.Y. An investigation of a gas-liquid swirling flow with shear-thinning power-law liquids[J]. *Phys. Fluids*, 2022, 34(7), 17.
- [7] 张栋. 气体/液固混合液管道流动及举升特性研究[D]. 中国科学院大学, 2019.

下一篇：**【前沿动态】湍流、旋转湍流与螺旋度——兼谈旋转湍流中能量与螺旋度的尺度输运效应**

版权所有 © 2023 中国科学院力学研究所 京ICP备05002803号-1 京公网安备110402500049

地址：北京市北四环西路15号 邮政编码：100190

